

# 碳纤维复合材料板振声特性分析及优化

刘成武, 郭小斌

(福建工程学院 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118)

**摘要:** 为了研究结构几何参数及铺层参数改变对碳纤维复合板的振动声辐射特性影响, 利用有限元/边界元法计算了碳纤维复合材料板的振动声辐射特性参数, 并以降低结构振动噪声为目标对其进行了优化分析。研究表明: 加筋、增加筋数和增加铺设层数能降低结构的辐射噪声。3种铺层角度中,  $[0^\circ/90^\circ/45^\circ]$  辐射噪声最低。在第一阶波峰处, 优化后声功率值相比优化前减少了大约 4 dB。研究结果可为降低结构辐射噪声提供理论依据。

**关键词:** 碳纤维复合材料板; 振动声辐射; 辐射声功率; 辐射效率; 优化

**中图分类号:** TB532

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-4348(2020)06-0518-06

## Analysis and optimization of vibration and acoustic characteristics of carbon fiber composite plates

LIU Chengwu, GUO Xiaobin

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** The influence of the changes in structural geometric parameters and laminate parameters on the vibration and acoustic radiation of the carbon fiber composite plate was investigated herein. Through the finite element/boundary element method, the characteristic parameters of the vibration and acoustic radiation of the carbon fiber composite plate was calculated, and optimization analysis was carried out in order to reduce the vibration and noise of the structure. The study shows that the radiation noise of the structure can be reduced by increasing the number of reinforcing bars and ply layers.  $[0^\circ/90^\circ/45^\circ]$  attains the lowest radiation noise out of the three ply angles. At the first wave crest, the value of the acoustic radiation power after optimization is reduced by approximately 4 dB compared with that before optimization. The results can provide theoretical basis for reducing structural radiation noise.

**Keywords:** carbon fiber composite plates; vibration acoustic radiation; acoustic radiation power; radiation efficiency; optimization

碳纤维复合材料板轻量、强度高、美观, 广泛用于手机外壳、汽车配件、航空航天及医疗健康领域等。由于其为不同纤维铺层方向的层合板挤压而成, 使其相较于普通材料板本构关系复杂, 振动与声学特性计算量大。针对不同条件下碳纤维复合材料板的声振特性进行模拟分析及参数研究, 在工程应用中有一定的参考价值和实际意义。王绍清等<sup>[1]</sup>应用有限元方法分析了复合材料板主

弹性模量、铺层方式等对结构固有频率的影响规律, 但未进行声学特性分析。文献[2-7]应用有限元/边界元结合的方法建立了复合材料层合板计算模型, 分析了结构尺寸与不同铺设方式等情况下对层合板声振特性的影响。胡莹, 李晨曦等<sup>[8]</sup>通过无限大障板理论及波动方程, 研究了复合材料板长度、压差等对机身结构减振降噪的影响。文献[9-10]分别利用遗传算法及多尺度优

收稿日期: 2020-07-27

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2018J01628)

第一作者简介: 刘成武(1975—), 男, 安徽枞阳人, 教授, 博士, 研究方向: 车辆 NVH 技术、结构多学科设计优化。

化理论对复合结构进行了优化分析。通过以上文献可知,许多专家学者对碳纤维复合材料板的振动声辐射特性做了大量的研究,但对于结构优化方面研究分析较少。本文在上述文献的基础上,利用 ABAQUS 与 Virtual.Lab 联合仿真的方法研究了碳纤维复合材料板几何参数与结构参数改变对声辐射特性的影响,为了使结构振动声辐射产生的噪声最小,对其进行了优化分析,为实际工程应用中能够性能不减、质量更轻、实践应用提供思路。

### 1 结构振动声辐射理论

封闭结构表面振动产生的结构声主要分为外声场与内声场。齐次声学波动方程可用来分析这类由结构声源产生的声波。线性化的齐次声学波动方程为:

$$\nabla^2 \tilde{P}(x,y,z,t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \tilde{P}(x,y,z,t)}{\partial t^2} = 0 \tag{1}$$

式中,  $\tilde{P}(x,y,z,t)$  为声压;  $c$  为在介质传播中的声波速度。

设  $\tilde{P}(x,y,z,t) = P(x,y,z,t)e^{i\omega t}$ , 代入(1)式中,得到 Helmholtz 微分方程为:

$$\nabla^2 P + k^2 P = 0 \tag{2}$$

式中,波数  $k = \omega/c$ ,  $\omega$  为圆频率。

声学 Neumann 边界条件为:

$$\frac{\partial P}{\partial n} = -i\omega\rho v_n \tag{3}$$

式中,  $\rho$  为介质密度;  $v_n$  为结构表面法向速度,对于无穷远处边界条件应满足:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \left[ r \left( \frac{\partial P}{\partial r} - ikr \right) \right] = 0 \tag{4}$$

对于镶嵌在无限大障板中的结构,由瑞利积分可得结构表面辐射声压为:

$$P(M) = i\omega\rho \int_s e^{-ikr} \frac{v_n}{2\pi r} ds \tag{5}$$

式中,  $r$  为结构表面任意一点  $M$  到场点  $N$  的距离,  $M \in s$ ,  $s$  为结构振动积分表面。

对式(5)进行离散,可得结构表面声压与表面法向速度关系为:

$$\{P\} = [D] \{v_n\} \tag{6}$$

式中,  $[D]$  为系数矩阵。

求得表面声压  $P$  后,板结构辐射声功率可表示为:

$$W = \frac{1}{2} \int_s \text{Re}(P v_n^*) ds \tag{7}$$

式中,  $v_n^*$  为  $v_n$  的共轭复数,  $\text{Re}$  为取实部。

根据辐射效率公式,可知薄板声辐射效率为

$$\sigma_{mn} = \frac{W_{mn}}{\rho c a b \langle v^2 \rangle} \tag{8}$$

式中,  $\langle v^2 \rangle$  为表面法向均方根振速;  $\rho$  为介质密度;  $a, b$  为结构的长和宽。

### 2 碳纤维复合材料板声辐射特性

选取碳纤维板尺寸:长 1 000 mm, 宽 800 mm, 厚度为 3 mm, 共分为 3 层, 每层厚度与材料参数均相同。板的边界条件设为四边简支, 材料参数:  $E_1 = 260 \text{ GPa}$ ,  $E_2 = 9.04 \text{ GPa}$ , 泊松比  $\nu_{12} = 0.3$ , 剪切模量  $G_{12} = 3.87 \text{ GPa}$ ,  $\rho = 1\,800 \text{ kg/m}^3$ 。在 ABAQUS 中对碳纤维复合材料板进行建模并进行谐响应分析, 简谐力为 100 N, 作用位置为板中心位置。碳纤维复合材料板模型如图 1 所示, 谐响应分析作用下, 0~200 Hz 碳纤维复合材料板表面振动速度如图 2 所示。

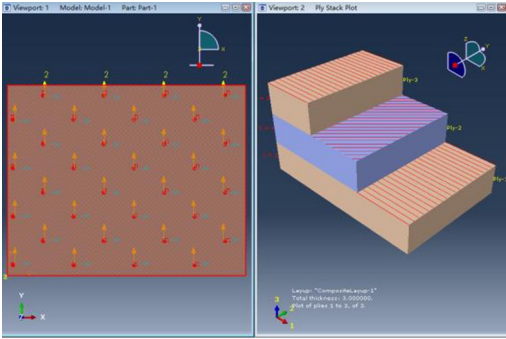


图 1 碳纤维复合材料板有限元模型  
Fig.1 Finite element model of carbon fiber composite plate

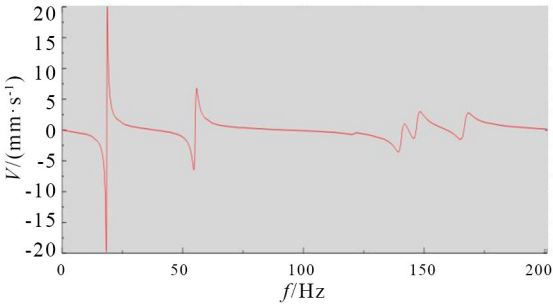


图 2 0~200 Hz 碳纤维复合材料板表面振动速度  
Fig.2 Surface vibration velocity of carbon fiber composite plate under acoustic vibration of 0~200 Hz

由图 2 可知,随着频率的增加,碳纤维复合材料板的表面振速幅值越来越小,这是由于材料本身阻尼影响所致。且可以看出在第一阶频率处表面振动速度达到最大值,间接说明在声辐射特性分析中要重点关注第一阶频率处声辐射特性。在得出碳纤维复合材料板表面振动速度后,利用 LMS Virtual.Lab 对碳纤维复合材料板进行声学分析,频率范围选 0~200 Hz,步长为 5 Hz。前六阶场点声压如图 3 所示。由图 3 可看出,在第一阶固有频率处辐射声压达到最大 125 dB,高于其他阶固有频率辐射最大声压。前三阶辐射声压均为垂直复合材料板场点顶端处的最大,而在第四到六阶固有频率点上,辐射声压相对分散并不是集中在某一区域。

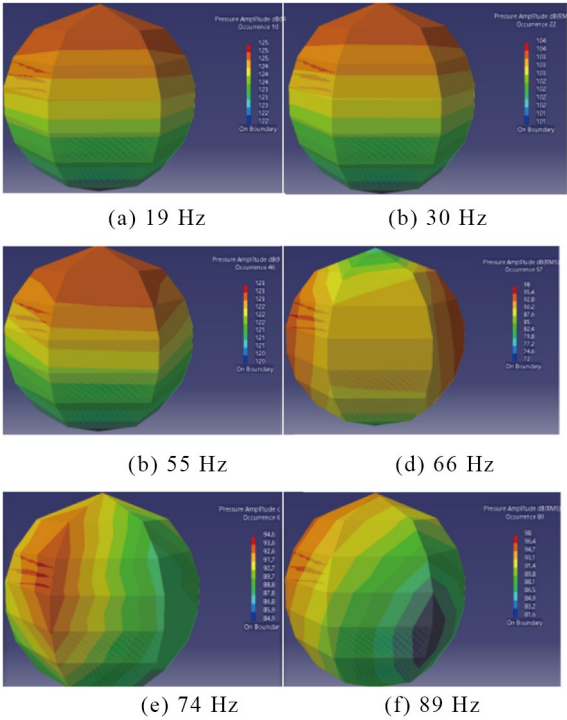


图 3 前六阶场点声压

Fig.3 Acoustic pressures at the first six fields

3 不同形式结构参数对碳纤维复合材料板声辐射特性的影响

3.1 加筋

本节分析加筋碳纤维复合材料板的振动声辐射特性,并比较加筋对碳纤维复合材料板振动声辐射特性的影响。两者前六阶频率如表 1 所示。

表 1 未加筋与加筋前 6 阶固有频率  
Tab.1 The first 6 natural frequencies of unreinforced and reinforced plates

阶次	$f_{\text{未加筋}}/\text{Hz}$	$f_{\text{加筋}}/\text{Hz}$
1	18.54	24.85
2	30.55	68.12
3	55.20	70.68
4	66.46	79.48
5	74.21	100.20
6	89.17	111.32

从表 1 可看出,在相同尺寸参数下,加筋之后碳纤维复合材料板的固有频率大于未加筋碳纤维复合材料板的固有频率,其原因是加筋增大了碳纤维复合材料板的刚度。

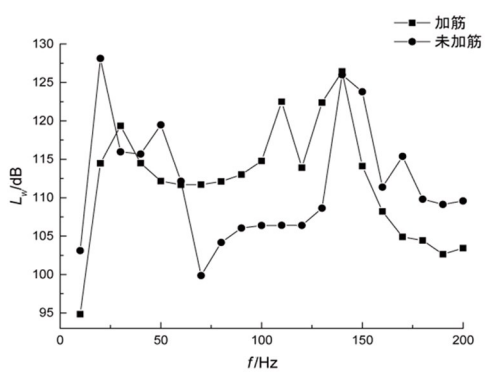
在 LMS Virtual.Lab 中对加筋碳纤维复合材料板模型声学特性进行分析,得出结果。未加筋与加筋复合材料板的辐射声功率级和均方根振速如图 4 所示。

从图 4 可看出,加筋与未加筋复合材料板声辐射功率级在 55~145 Hz,加筋碳纤维复合材料板的辐射声功率级大于未加筋碳纤维复合材料板的辐射声功率级,而在其他部分未加筋大于加筋碳纤维复合材料板的辐射声功率级。从整体上看,在 0~200 Hz 范围内,未加筋碳纤维复合材料板的辐射均方根振速大于加筋碳纤维复合材料板的辐射均方根振速,且两者曲线形式基本一致。

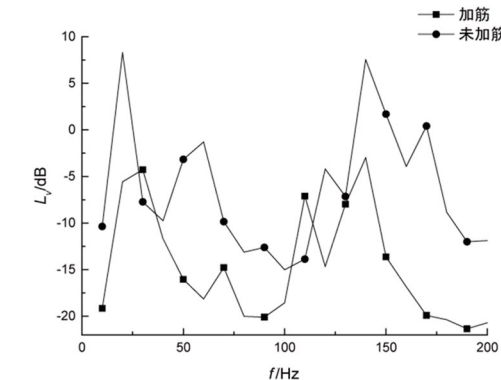
3.2 不同加筋数量

选取在碳纤维复合材料板上加 1、2、3 条筋板来探究筋数对声辐射特性的影响,加筋位置选为中心布置或对称布置。声辐射特性指标参数频率范围选为 0~200 Hz,对 3 种数量筋条进行声学分析,不同筋条数量声辐射功率级和均方根振速如图 5 所示。

从图 5(a)中可看出,随着加筋数量的增加,碳纤维复合材料板辐射声功率级逐渐减小,即 3 筋辐射声功率级最小,1 筋辐射声功率级最大,增加筋数能降低碳纤维复合材料板辐射声功率级。图 5(b)在第一阶频率处,3 条加筋数的碳纤维复合材料板的均方根振速最高,2 筋次之,1 筋最小,而从整体趋势来看,2 条加强筋的均方根振速最高。



(a) 声辐射功率级



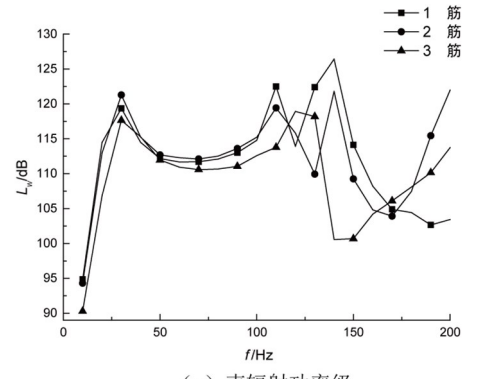
(b) 均方根振速

图 4 未加筋与加筋碳纤维复合材料板声辐射影响对比  
Fig.4 Comparison of sound radiation effects between unreinforced and reinforced carbon fiber composite plates

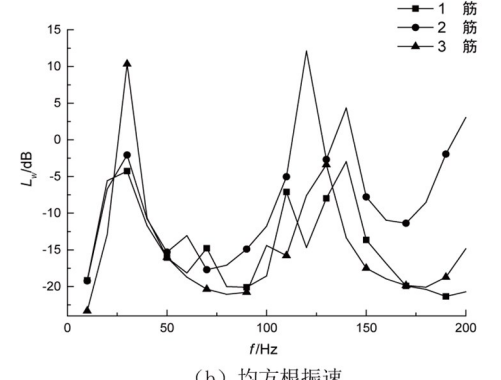
3.3 不同铺层角度

为了探究纤维铺层方向排布顺序对碳纤维复合材料板振动及声学特性的影响,选取 3 种排布顺序,顺序 1 为 $[0^\circ/45^\circ/90^\circ]$ ,顺序 2 为 $[0^\circ/90^\circ/45^\circ]$ ,顺序 3 为 $[45^\circ/0^\circ/90^\circ]$ 。对 3 种纤维方向排布顺序碳纤维复合材料板进行有限元模型分析,获取结构表面振动速度,将其作为声学分析边界条件导入 LMS Virtual.Lab 中进行声学分析,求得 3 种排布顺序辐射声功率级、声辐射效率对比结果如图 6 所示。

由图 6(a) 可知,在第一阶频率处 $[45^\circ/0^\circ/90^\circ]$ 纤维铺层方向的辐射声功率级最大,其他两种基本相同。从图 6(b) 中可看出,在 0~120 Hz 范围内纤维铺层方向为 $[0^\circ/90^\circ/45^\circ]$ 声辐射效率最高, $[0^\circ/45^\circ/90^\circ]$ 次之, $[45^\circ/0^\circ/90^\circ]$ 声辐射效率最小。而在 120~200 Hz 范围内 $[45^\circ/0^\circ/90^\circ]$ 声辐射效率逐渐升高,且高于其他两种纤维铺层方向。



(a) 声辐射功率级



(b) 均方根振速

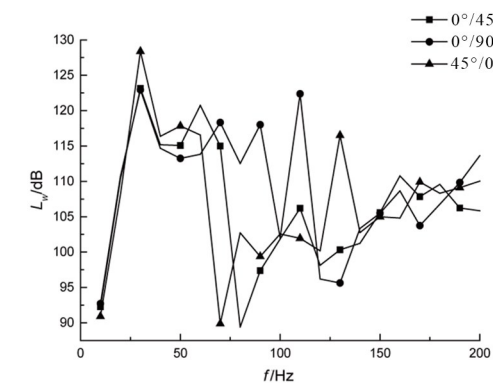
图 5 不同加筋数量对碳纤维复合材料板声辐射的影响  
Fig.5 Influence of the number of reinforcing bars on the sound radiation of carbon fiber composite plates

3.4 不同铺设层数

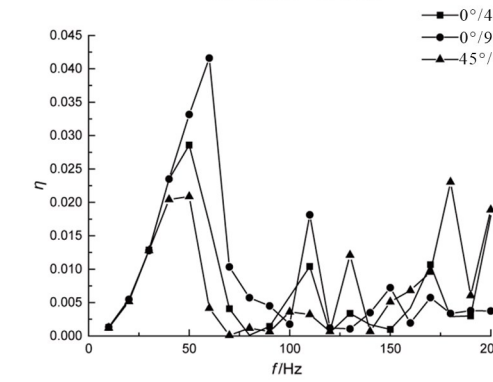
以碳纤维复合材料加筋板为研究对象,铺层方式设置为对称铺设,取 4 种不同铺设层数 $[-\theta/\theta/-\theta]$ 、 $[\theta/-\theta/-\theta/\theta]$ 、 $[\theta/-\theta/\theta/-\theta]$ 、 $[\theta/-\theta/\theta/\theta/-\theta/\theta]$ 进行研究,其中 $\theta$ 为铺层角度,为减少其他变量对研究结果的影响,角度统一为 $45^\circ$ 。碳纤维复合材料板的尺寸与材料参数选取与第 2 节相同,边界条件为四边简支,每层材料参数及厚度均相同。

不同铺设层数对碳纤维复合材料加筋板的辐射声功率级影响曲线、均方根振速影响曲线和辐射效率影响曲线如图 7 所示。由图 7(a) 可看出,铺设层数由 3 层变化为 6 层,随着层数的增加,碳纤维复合材料加筋板的声功率级幅值降低,说明增加铺设层数能够降低结构的辐射噪声。由图 7(b) 可以看出,随着层数的增加,碳纤维复合材料加筋板固有频率增加,曲线峰值向右移动,辐射效率也相应增大。

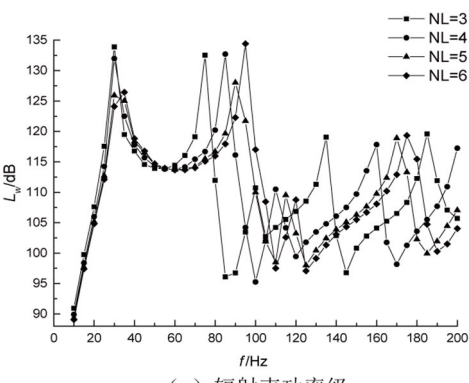




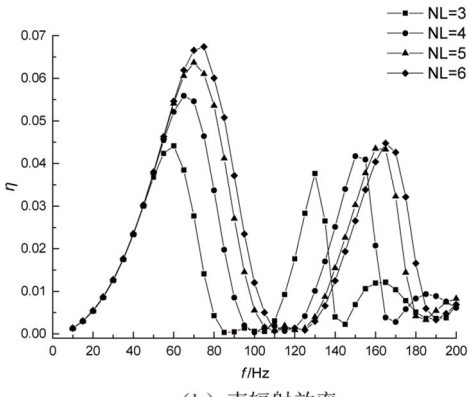
(a) 辐射声功率级



(b) 声辐射效率



(a) 辐射声功率级



(b) 声辐射效率

图 6 纤维方向对碳纤维复合材料板声辐射特性的影响

Fig.6 Influence of fiber direction on the acoustic radiation characteristics of carbon fiber composite plates

图 7 不同铺设层数变化对碳纤维复合材料板声辐射影响

Fig.7 Influence of different layering numbers on the acoustic radiation of carbon fiber composite plates

4 碳纤维复合材料加筋板结构优化

选取碳纤维板尺寸:长 1 000 mm,宽 800 mm,厚度为 3 mm,分为 3 层,每层厚度与材料参数均相同。板的边界条件设为四边简支,材料参数:  $E_1 = 260 \text{ GPa}$ ,  $E_2 = 9.04 \text{ GPa}$ ,泊松比  $\nu_{12} = 0.3$ ,剪切模量  $G_{12} = 3.87 \text{ GPa}$ ,  $\rho = 1\,800 \text{ kg/m}^3$ 。加强筋的初始尺寸为筋宽 6.35 mm,筋高 12.7 mm,加强筋沿碳纤维板纵向分布,加强筋的材料参数为:弹性模量 211 GPa,泊松比 0.3,密度 7 830  $\text{kg/m}^3$ 。

碳纤维复合材料板长宽比一定情况下,选择铺层厚度  $h$ 、筋条宽度  $m$  和筋条高度  $n$  为设计变量,以碳纤维复合材料加筋板表面振速最小为目标。在 Isight 中进行参数优化,设计变量范围为:  $1 \leq h \leq 3, 5 \leq m \leq 20, 3 \leq n \leq 15$ 。

经过 33 次迭代优化,得到最佳结构参数  $h = 3 \text{ mm}$ ,  $m = 20 \text{ mm}$ ,  $n = 8.95 \text{ mm}$ 。将最优参数代入有限元中进行分析,两者前六阶频率如表 2 所示。

由表 2 可看出,优化后碳纤维复合材料加筋

板固有频率明显增加,在第一阶频率处增加 40.76 Hz,为了更直观地观察优化前后声辐射功率的变化,声辐射频率范围选取为 0~600 Hz。在此基础上,对其进行谐响应分析提取结构表面振动速度带入声学软件 Virtual.Lab 中计算,获得优化前后辐射声功率级如图 8 所示。

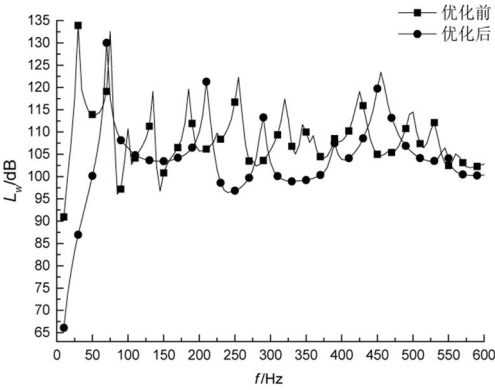


图 8 优化前后辐射声功率级

Fig.8 Radiated sound power levels before and after optimization

表 2 优化前后前六阶频率

Tab.2 The first six frequencies before and after optimization

阶数	$f_{\text{优化前}}/\text{Hz}$	$f_{\text{优化后}}/\text{Hz}$
1	29.19	69.95
2	53.52	139.63
3	75.21	209.60
4	81.72	210.85
5	101.24	288.97
6	118.70	299.74

由图 8 可看出,优化后碳纤维复合材料加筋板的峰值向右移动,这是因为优化后固有频率增大的缘故,且在相同频率范围内,优化后波峰数明

显减少也间接地减少了发生结构共振的可能。比较优化前后第一阶波峰处声功率值,优化后比优化前减少了大约 4 dB。

5 结论

1)加筋能降低碳纤维复合材料板的辐射噪声;即增加加强筋数量能降低结构噪声辐射。3 种铺层角度中,[0°/90°/45°]铺层角度在第一个峰值处辐射噪声最低;增加铺设层数能够降低结构的辐射噪声。

2)优化后碳纤维复合材料加筋板的固有频率增大,且优化后波峰数减少降低了发生结构共振的可能。一阶频率处辐射声功率级降低 4 dB,结构辐射噪声减小。

参考文献:

[1] 王绍清,刘鹏,梁森. 复合材料层合板动力学性能及影响参数的研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018(12): 36-40.

[2] LEE S, KIM M, PARK C, et al. Effect of fiber orientation on acoustic and vibration response of a carbon fiber/epoxy composite plate: Natural vibration mode and sound radiation[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2016, 117: 162-173.

[3] SHARMA N, MAHAPATRA T, PANDA S. Vibro-acoustic behaviour of shear deformable laminated composite flat panel using BEM and the higher order shear deformation theory[J]. Composite Structures, 2017, 180: 116-129.

[4] 黎胜,赵德有. 复合材料层合板的铺层几何对结构声传输的影响[J]. 振动与冲击, 2001, 20(2): 86-88.

[5] 王嘉伟. 碳纤维复合材料板振声模拟及其参数影响特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.

[6] 王县委,吴锦武. 不同铺设角度下层合板结构参数对声功率影响[J]. 应用声学, 2016, 35(2): 144-150.

[7] 张英蓉,沈火明,张鑫,等. 加筋位置对铝型材板振动声辐射特性的影响分析[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2016, 29(6): 48-51.

[8] 胡莹,李晨曦,林森. 复合材料机身结构声学特性及影响参数分析[J]. 应用声学, 2019, 38(3): 333-344.

[9] 陈炉云,张裕芳. 基于遗传算法的复合材料结构-声辐射优化研究[J]. 复合材料学报, 2012, 29(3): 203-207.

[10] 段尊义. 纤维增强复合材料框架结构拓扑与纤维铺角一体化优化设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.

(责任编辑:陈雯)